

Дослідження наногетероструктур на потрійних сполуках $A^{III}B^V$ для моделювання їх електронних властивостей та ефектів

Исследование наногетероструктур на тройных соединениях $A^{III}B^V$ для моделирования их электронных свойств и эффектов

Research of nanoheterostructures based on ternary alloys $A^{III}B^V$ for modeling of their electronic properties and effects

1. Номер державної реєстрації: 0115U000400,

2. Науковий керівник – д.т.н., проф. В.І.Тимофєєв, В.И.Тимофеев, V.Timofeyev .

3. Суть розробки, основні результати.

(укр.)

Предметом дослідження є електричні й оптоелектронні характеристики потрійних сполук $A^{III}B^V$ та структур на їх основі. Особлива увага приділяється дослідженню динамічних характеристик потрійних сполук у сильних полях, ефекти розігрівання електронного газу та інші ефекти, що властиві таким матеріалам при досягненні нанорозмірів, а також явища на границях низькорозмірних структур з пасивними областями та контактами.

Створено фундаментальні фізико-математичні засади для моделювання наногетероструктур, що використовують двокомпонентні тверді розчини бінарних сполук $A^{III}B^V$. Використано удосконалений метод релаксаційних рівнянь, у якому замість рівняння балансу енергії використовується рівняння для електронної температури. Розраховано часи релаксації імпульсу та енергії електронів для різних механізмів розсіювання. Вперше отримано аналітичні співвідношення для розрахунку міждолинних часів релаксації за довільних значень міждолинної відстані порівняно з енергією міждолинних фононів. Такий аналіз є необхідним для потрійних сполук, у яких положення долин суттєво залежить від стехіометричного складу. Для сполук з широкою фононною забороненою зоною розсіювання на акустичних та оптичних фонах розглянуто як окремі види міждолинного розсіювання. При моделюванні враховані часи релаксації для розсіювання на сплавному деформаційному потенціалі.

На основі системи релаксаційних рівнянь виведено систему рівнянь для моделювання субмікронних гетероструктур з квантовими ямами. Розроблено методики моделювання наногетероструктур з урахуванням квантових ефектів та специфічних для потрійних сполук механізмів розсіювання.

(рос.)

Предметом исследования являются электрические и оптоэлектронные свойства тройных соединений $A^{III}B^V$ и структур на их основе. Особое внимание уделяется исследованию динамических характеристик тройных соединений в сильных полях, эффекты разогрева электронного газа и другие эффекты, присущие таким материалам при достижении наноразмеров, а также явления на границах низкоразмерных структур с пассивными областями и контактами.

Созданы фундаментальные физико-математические основы для моделирования наногетероструктур, использующих двухкомпонентные твердые растворы бинарных соединений $A^{III}B^V$. Использован усовершенствованный метод релаксационных уравнений, в котором вместо уравнения баланса энергии используется уравнение для электронной температуры. Рассчитано время релаксации импульса и энергии электронов для различных механизмов рассеяния. Впервые получены аналитические соотношения для расчета междолинных времен релаксации при произвольных значениях междолинного расстояния по сравнению с энергией междолинных фононов. Такой анализ необходим для тройных соединений, в которых положение долин существенно зависит от стехиометрического состава. Для соединений с широкой фононной запрещенной зоной рассеяние на акустических и оптических фонах рассмотрено как отдельные виды

междолинного рассеяния. При моделировании учтены времена релаксации для рассеяния на сплавном деформационном потенциале.

На основе системы релаксационных уравнений выведена система уравнений для моделирования субмикронных гетероструктур с квантовыми ямами. Разработаны методики моделирования наногетероструктур с учетом квантовых эффектов и специфических для тройных соединений механизмов рассеяния.

The subject of the research is the electrical and optoelectronic characteristics of triple $A^{III}B^V$ compounds and based on them structures. The main attention was paid to the investigation of the dynamic characteristics of triple compounds in strong fields, the effects of heating the electron gas and other effects, which are inherent in such nanosizes materials, as well as phenomena on the boundaries of low-dimensional structures with passive regions and contacts.

The basic physical and mathematical principles for the modeling of nanoheterostructures using two-component solid solutions of binary compounds of $A^{III}B^V$ have been created. An improved method of relaxation equations is used, in which the equation for the electronic temperature is used instead of the energy balance equation. The momentum relaxation and electron energy for different scattering mechanisms are calculated. For the first time, analytical relations were obtained for calculating the inter-valley relaxation times for arbitrary values of the inter-valence distance in comparison with the energy of inter-valence phonons. Such an analysis is necessary for triple compounds, in which the valley position essentially depends on the stoichiometric composition.

The acoustic and optical phonons are considered as separate types of inter-valued scattering for compounds with a broad phonon band gap, The simulation takes into account the relaxation times for scattering on the alloy deformation potential.

The system of equations for the simulation of submicron heterostructures with quantum wells is derived on the basis of the system of relaxation equations,

The methods of modeling of nanoheterostructures are developed including quantum effects and scattering mechanisms which are specific for triple compounds.

4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності

Заявки не подавались.

5. Порівняння зі світовими аналогами. Результати відповідають світовому рівню, а підходи до моделювання досліджуваних матеріалів та структур перевищують аналоги світової практики.

6. Економічна привабливість для просування на ринок Результати роботи можуть бути використані в рамках договорів на виконання НДДКР. Використання запропонованих у роботі результатів дозволить прогнозувати характеристики, можливі варіанти конструкцій та технологічної реалізації нанокомпонентів і наносхем, а також скоротити час їх проектування.

7. Потенційні користувачі

Пакети комп'ютерних програм моделювання будуть використані вітчизняними підприємствами, які розробляють компоненти і інтегральні схеми, включаючи надшвидкодійні цифрові, потужні та малошумлячі пристрої міліметрового діапазону, оптоелектронні пристрої. Можливе також використання результатів досліджень для розрахунку тестових низькорозмірних структур на потрійних сполуках щодо розроблення субмікронних і наноприладів на підприємствах («Сатурн» і «Мікроприлад»).

8. Стан готовності розробки. У подальшому планується виконання прикладної роботи, яка на основі розробленої теорії фізичних процесів, методів та математичних моделей

дозволить розробити нові перспективні конструкції надшвидкодіючих наноприладів та інтегральні схеми надвеликого ступеня інтеграції.

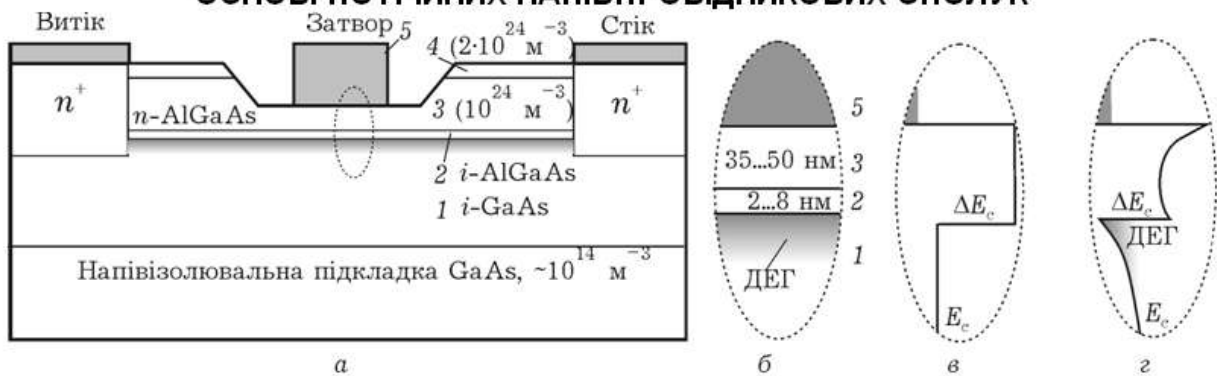
9. Існуючі результати впровадження.

Результати роботи використовуються у навчальному процесі «КПІ» ім. Ігоря Сікорського: при викладанні дисципліни «Фізика електронних процесів» (новий розділ «Фізичні процеси у багатшарових низькорозмірних системах»); дисципліни «Мікрохвильова техніка» (новий розділ «Субмікронні наноконпоненти КВЧ»); дисципліни «Основи наноелектроніки» (новий розділ «Динамічні властивості низькорозмірних транзисторних структур»); оновлено зміст дисципліни «Мікро- та наносистеми» для підготовки магістрів за спеціальністю «Мікро і наносистемна техніка».

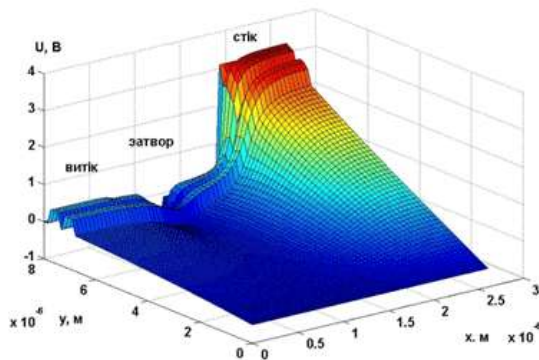
10. Назва підрозділу, телефон, e-mail. КПІ ім. Ігоря Сікорського, факультет електроніки, кафедра електронної інженерії, (044) 236-51-50, v.timofeyev@kpi.ua

11. Фото розробки

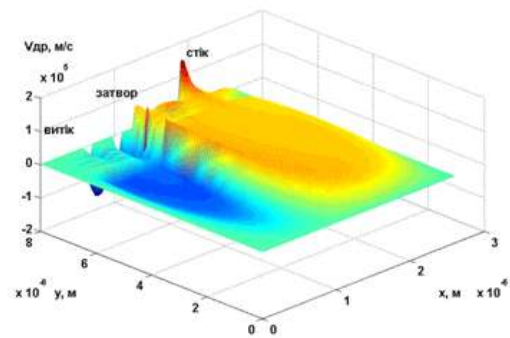
МОДЕЛЮВАННЯ ГЕТЕРОТРАНЗИСТОРІВ З СИСТЕМОЮ КВАНТОВИХ ЯМ НА ОСНОВІ ПОТРІЙНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СПЛУК



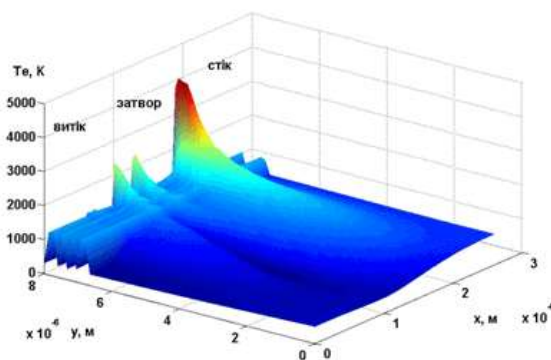
Гетероструктурний транзистор з двовимірним електронним газом (ДЕГ) у квантових ямах



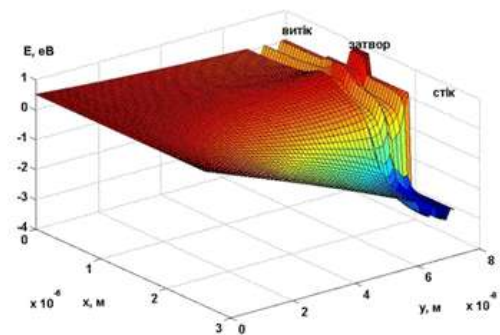
Розподіл потенціалу у структурі двоканального гетеротранзистора



Розподіл дрейфової швидкості електронів у структурі двоканального гетеротранзистора



Розподіл електронної температури у двоканальному гетеротранзисторі з довжиною затвора 0,3 мкм



Потенціальна енергетична поверхня у двоканальному гетеротранзисторі з довжиною затвора 0,3 мкм

12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання Монографія

Москалюк В.А., Тимофеев В.И., Федяй А.В. Быстродействующие приборы электроники, часть 2, монография, изд. LAMBERT ACADEMIC PUBLISHING. –2014. – Р. 224. ISBN:978-3-659-55331-8

Публікації, що входять до наукометричних баз даних, у реферованих журналах

1. Timofeyev V.I., E.Faleyeva, E.Semenovskaya Electrothermal analysis of GaN power submicron field-effect heterotransistors / Radioelectronics and Communications Systems. V.59. – №2. – P.66-73. Allerton Press. 2016. <http://link.springer.com/article/10.3103/S0735272716020035>
2. Vladimir Timofeyev and Igor Shalenko Modeling of the Quantum Cascade Laser Characteristics // 2016 IEEE 35th International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO). - Kiev, Ukraine. - April 19-21, 2016. P.98-100. . <http://ieeexplore.ieee.org/document/7493020/>
3. Vladymyr Timofeyev, Elena Faleyeva, Elena Semenovskaya Thermal Analysis of Power Heterostructure Field-Effect Transistors // 2015 IEEE 35th International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO). - Kiev, Ukraine. - April 21-24, 2015. - C. 239 - 241. <http://dx.doi.org/10.1109/ELNANO.2015.7146882>.
4. Iryna Baida, Vladimir Moskaliuk, Vladimir Timofeyev Aspects of intervalley scattering simulation in ternary alloys / 2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo). DOI: [10.1109/UkrMiCo.2016.7739623](https://doi.org/10.1109/UkrMiCo.2016.7739623) <http://ieeexplore.ieee.org/document/7739618/>

5. V. Moskaliuk, T. Saurova, Compact models of the double-barrier resonant tunneling diode / Proc. 35th International Conference on 2015 IEEE ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY (EL-NANO) P.177-180 <http://ieeexplore.ieee.org/document/7146866/>
6. Iryna Baida, Vladimir Moskaliuk Occupation of the valleys in multivalley semiconductors / Proc. 35th International Conference on 2015 IEEE ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY (ELNANO) p.174-176. <http://dx.doi.org/10.1109/ELNANO.2015.7146865>.
7. V.Moskaliuk, Y.Tsyba Simulation of defects in one-dimensional photonic crystal / Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2017 IEEE 37th International Conference Conference on Electronics and Nanotechnology P. 234-238.
8. V.Moskaliuk, I Baida, K Kulikov Electron heating during interval-ley scattering / Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2016 IEEE 36th International Conference Conference on Electronics and Nanotechnology P.17-20 <http://ieeexplore.ieee.org/document/7493000/>
9. Konstantin Kulikov, Volodymyr Moskaliuk and Volodymyr Timofeyev High-frequency conductance cutoff of gallium nitride / Міжнародна конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки **УкрМіКо'2017** 11-15 вересня 2017 р. м. **Одеса**
10. Iryna Baida and Volodymyr Moskaliuk Alloy Scattering Relaxation Time Simulation / Міжнародна конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки **УкрМіКо'2017** 11-15 вересня 2017 р. м. **Одеса**
11. В.І. Тимофєєв, І.В. Шаленко Аналіз підсилення квантових каскадних лазерів // Н.-техн. сб. «Електроника и связь», № 5. – 2015. – с.22 – 28.
12. О.Ю.Кутова, В.І.Тимофєєв, О.І.Шуляк. Моделювання польових структур для біосенсорів з системами квантових точок // Н.-техн. сб. «Електроника и связь», № 2 (91). – 2016. – с.18 – 23.

13. Ключові слова до розробки: трикомпонентні тверді сполуки $A^{III}B^V$, механізми розсіювання, міждолинне розсіювання, сплавне розсіювання, сплавний потенціал, часи релаксації, сильне електричне поле, балістичний транспорт, багашарові гетероструктури, квантові ями, динамічні характеристики, гранична частота, імпульсні властивості, фотодетектори ІЧ діапазону.